



DPW

PATENTS

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

APPLICANT: FLORIAN TAUSER ET AL. - 2
SERIAL NO.: 10/787,001 GROUP: 3663
FILED: FEBRUARY 25, 2004
TITLE: GENERATION OF TUNABLE LIGHT PULSES

CLAIM OF PRIORITY

MAIL STOP AMENDMENTS
Commissioner of Patents
P.O. Box 1450
Alexandria, VA 22313-1450

Dear Sir:

Applicants herewith claim the benefit of priority of their earlier-filed application under the International Convention in accordance with 35 U.S.C. 119. Submitted herewith is a certified copy of the German application having the Serial No. 10 2004 009 066.1, bearing the filing date of February 23, 2004. A certified copy of Applicants' other priority application, German application having the Serial No. 103 08 249.2 filed February 25, 2003, was submitted with our Response to Notice to File Missing Parts mailed June 10, 2004.

It is hereby requested that receipt of this priority document be acknowledged by the Patent Office.

Respectfully submitted,
FLORIAN TAUSER ET AL. - 2

COLLARD & ROE, P.C.
1077 Northern Boulevard
Roslyn, New York 11576
(516) 365-9802
FJD/jc

Allison O. Collard; Reg.No.22,532
Edward R. Freedman; Reg.No.26,048
Frederick J. Dorchak; Reg.No.29,298
Attorneys for Applicants

Enclosure: Certified Copy of German Priority Document

I hereby certify that this correspondence is being deposited with the U.S. Postal Service as first class mail in an envelope addressed to: Commissioner of Patents, P.O. Box 1450, Alexandria, VA 22313-1450, on June 17, 2004.

Maria Guastella

Maria Guastella

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

Aktenzeichen: 10 2004 009 066.1

Anmeldetag: 23. Februar 2004

Anmelder/Inhaber: TOPTICA Photonics AG, 82152 Planegg/DE

Bezeichnung: Erzeugung abstimmbarer Lichtimpulse

Priorität: 25. Februar 2003 DE 103 08 249.2

IPC: G 02 F, H 01 S

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 7. Juni 2004
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

Wehner

Erzeugung abstimmbarer Lichtimpulse

5 Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Erzeugung abstimmbarer Lichtimpulse, mit einer nichtlinearen optischen Faser, mittels welcher das optische Spektrum von Femtosekunden-Lichtimpulsen unter Ausnutzung solitonischer Effekte modifizierbar ist.

Lasersysteme, die in der Lage sind, Femtosekunden-Lichtimpulse zu erzeugen,
10 werden in der physikalischen Grundlagenforschung und auch in anderen Forschungsgebieten zunehmend angewendet. Mit derartigen Lasersystemen können schnelle physikalische, chemische und biologische Prozesse quasi in "Echtzeit" beobachtet werden. Kommerzielle Einsatzfelder für Femtosekunden-Lichtimpulse erzeugende Lasersysteme bestehen auf den Gebieten der
15 Materialuntersuchung und -bearbeitung, auf dem Gebiet der Medizin sowie auf dem so genannten "Life-Science"-Gebiet. Als konkrete Anwendungen sind die Multi-Photonen-Mikroskopie sowie die optische Kohärenz-Tomographie beispielhaft zu nennen.

Gerade im Bereich der Ein- und Multi-Photonen-Mikroskopie besteht Bedarf
20 nach sowohl leistungsstarken als auch spektral variablen Lasersystemen, die kostengünstig und einfach bedienbar sind. Bisher wurden Femtosekunden-Lichtimpulse hoher Leistung im Labor üblicherweise mittels Titan-Saphir-Lasersystemen erzeugt. Diese Systeme sind nachteiligerweise sehr teuer, justageaufwendig und umständlich in der Handhabung. Auch ist die
25 Durchstimmbarkeit des optischen Spektrums der erzeugten Lichtimpulse bei solchen Lasersystemen nicht zufrieden stellend.

Heutzutage geht man dazu über, Femtosekunden-Lichtimpulse mit Impulsenergien von einem Nanojoule und mehr mittels rein faserbasierten Lasersystemen zu erzeugen. Derartige Systeme bestehen üblicherweise aus einer gepulsten Laserlichtquelle, die Femtosekunden-Lichtimpulse im
5 Energiebereich von 100 Pikojoule emittieren. Diese Lichtimpulse werden dann mittels einer optisch gepumpten Verstärkerfaser verstärkt, sodass die Lichtimpulse im gewünschten Impulsenergiebereich zur Verfügung stehen.

Beispielsweise aus der EP 1 118 904 A1 ist eine Vorrichtung zur Erzeugung abstimmbarer Lichtimpulse vorbekannt. Die bekannte Vorrichtung arbeitet mit
10 einer speziellen nichtlinearen optischen Faser, mittels welcher das optische Spektrum von Femtosekunden-Lichtimpulsen, die von einer geeigneten gepulsten Laserlichtquelle geliefert werden, unter Ausnutzung solitonischer Effekte gezielt modifiziert werden kann. Zur Variation des Spektrums der erzeugten Lichtimpulse wird bei dem in der genannten Druckschrift
15 beschriebenen System die Intensität des in die nichtlineare optische Faser eingekoppelten Lichts variiert. Daraus ergibt sich unmittelbar der Nachteil, dass bei dem vorbekannten System das gewünschte optische Spektrum der erzeugten Lichtimpulse von der Impulsenergie abhängt. Eine unabhängige Variation der Impulsenergie und der Wellenlänge der Lichtimpulse ist
20 dementsprechend mit dem vorbekannten System nicht möglich. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass bei dem vorbekannten System die eingesetzte nichtlineare optische Faser eine Länge von mehreren 10 m aufweisen muss, damit die gewünschten solitonischen optischen Effekte in ausreichendem Maße wirksam werden. Durch die lange Laufstrecke kann es zu einem unerwünschten Kohärenzverlust der erzeugten Lichtimpulse kommen.
25

Davon ausgehend ist es Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Vorrichtung zur Erzeugung abstimmbarer Lichtimpulse bereitzustellen, bei welcher die aus dem Stand der Technik bekannten Nachteile vermieden werden. Insbesondere sollen weit abstimmbare Lichtimpulse erzeugbar sein, wobei die Impulsenergie
30 und die Wellenlänge der Lichtimpulse unabhängig voneinander variiert werden können.

Diese Aufgabe löst die Erfindung ausgehend von einer Vorrichtung der eingangs genannten Art dadurch, dass der nichtlinearen optischen Faser ein optischer Kompressor vorgeschaltet ist.

Wie sich zeigt, führen nichtlineare Prozesse in der Faser, in welche die Lichtimpulse bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung eingekoppelt werden, dazu, dass sich in der Faser zwei separate Lichtimpulse ausbilden, deren Spektrum gegenüber demjenigen des eingekoppelten Lichtimpuls zum langwelligen bzw. kurzwelligen Spektralbereich hin verschoben ist. Dabei ist die spektrale Trennung der Lichtimpulse mittels des optischen Kompressors, der der nichtlinearen optischen Faser bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung vorgeschaltet ist, einstellbar. Durch den optischen Kompressor wird das zeitliche Frequenzverhalten (engl. "chirp") der eingekoppelten Lichtimpulse gezielt beeinflusst. Das mittels der nichtlinearen optischen Faser modifizierte optische Spektrum hängt dann empfindlich von dem vorgegebenen "chirp" ab, sodass die gewünschte Abstimmbarkeit der Lichtimpulse gegeben ist. Vorteilhaft ist insbesondere, dass das optische Spektrum der mittels der erfindungsgemäßen Vorrichtung erzeugten Lichtimpulse unabhängig von der Impulsenergie variiert werden kann.

Bei Experimenten hat sich gezeigt, dass die erfindungsgemäße Vorrichtung vorteilhafterweise mit einer sehr kurzen nichtlinearen optischen Faser mit einer Länge von nur wenigen Zentimetern zur gewünschten Modifikation des optischen Spektrums der Lichtimpulse auskommt. Dadurch werden Kohärenzverluste der erzeugten Lichtimpulse wirksam vermieden.

Die in die nichtlineare optische Faser der erfindungsgemäßen Vorrichtung eingekoppelten Lichtimpulse sollten eine Impulsenergie von wenigstens einem Nanojoule haben. Derartig hohe Impulsenergien sind wünschenswert, damit die solitonischen optischen Effekte zur Erzeugung der abstimmbaren Lichtimpulse innerhalb der nichtlinearen optischen Faser im erforderlichen Maße auftreten.

Sinnvollerweise sollte der optische Kompressor der erfindungsgemäßen Vorrichtung verstellbar ausgebildet sein, derart, dass der zeitliche Frequenzverlauf der in die nichtlineare optische Faser eingekoppelten

Lichtimpulse veränderbar ist. Dies ermöglicht es auf komfortable und einfache Weise, die erzeugten Lichtimpulse auf die gewünschten Wellenlängen abzustimmen, indem die verstellbaren Elemente des optischen Kompressors, wie beispielsweise Prismen oder optische Gitter, in geeigneter Weise justiert werden.

Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist die nichtlineare optische Faser polarisationserhaltend und dispersionsverschoben ausgebildet. Eine derartige Faser ist beispielsweise in dem Artikel von T. Okuno et al. in der Zeitschrift IEEE Journal of Selected Topics of Quantum Electronics, Bd. 5, S. 1385, 1999, beschrieben. Die erwähnten solitonischen optischen Effekte, die zur gewünschten Modifikation des Spektrums der Lichtimpulse gemäß der Erfindung führen, treten in der nichtlinearen optischen Faser auf, wenn die Wellenlänge der in die Faser eingekoppelten Lichtimpulse im Bereich der Nulldispersions-Wellenlänge der Faser liegt. Bei Experimenten wurde zur Erzeugung abstimmbarer Lichtimpulse mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung eine nichtlineare optische Faser eingesetzt, deren Nulldispersions-Wellenlänge im Bereich von $1,52\text{ }\mu\text{m}$ liegt.

Lichtimpulse mit einem besonders breiten optischen Spektrum können mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung erzeugt werden, wenn die nichtlineare optische Faser einen besonders kleinen Kerndurchmesser von $\leq 5\text{ }\mu\text{m}$ hat. Bei Experimenten wurde eine Faser mit einem Kerndurchmesser von $3,7\text{ }\mu\text{m}$ erfolgreich eingesetzt, wobei eine Faserlänge von nur 7 cm sich als ausreichend erwiesen hat. Damit ergibt sich ein nutzbarer Wellenlängenbereich zur Abstimmung der Lichtimpulse mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung, der sich von etwa $1,1\text{ }\mu\text{m}$ bis $2,0\text{ }\mu\text{m}$ erstreckt.

Neben herkömmlichen optischen Glasfasern können gemäß der Erfindung auch mikrostrukturierte photonische Fasern als nichtlineare optische Faser zur Erzeugung der abstimmbaren Lichtimpulse verwendet werden. Derartige Fasern weisen im Bereich des Kerns eine transversale Mikrostruktur auf. Durch geeignete Anpassung der Nulldispersions-Wellenlänge sowie durch geringe Kerndurchmesser und somit hohe Nichtlinearität solcher Kristallfasern ist die Erzeugung weit abstimmbarer Lichtimpulse gemäß der Erfindung möglich.

Optional kann bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung der nichtlinearen optischen Faser ein zusätzlicher optischer Kompressor nachgeschaltet sein, um am Ausgang der Vorrichtung Lichtimpulse mit einer minimalen Impulsdauer zu erzielen. Bei Experimenten hat sich der Einsatz eines Prismen-Kompressors unter Verwendung von Prismen aus SF10-Glas bewährt. Damit ließen sich Impulsdauern von ≤ 25 Femtosekunden erzielen.

Eine sinnvolle Weiterbildung der erfindungsgemäßen Vorrichtung besteht darin, ein optisches Messinstrument zur Charakterisierung der mittels der nichtlinearen optischen Faser modifizierten Lichtimpulse vorzusehen. Bei Experimenten hat sich der Einsatz eines Spektrometers sowie des bekannten FROG-Aufbau bewährt.

Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung wird im Folgenden unter Bezugnahme auf die Zeichnung näher erläutert.

Bei dem in der Zeichnung schematisch dargestellten Aufbau ist eine gepulste Laserlichtquelle 1 vorgesehen, welche Femtosekunden-Lichtimpulse mit einer Impulsenergie von mehr als einem Nanojoule emittiert. Bei der Laserlichtquelle 1 kann es sich vorteilhafterweise um ein vollständig faserbasiertes System handeln, das aus einem kommerziell erhältlichen gepulsten Faserlaser und einer diesem nachgeschalteten optischen gepumpten Verstärkerfaser zusammengesetzt ist. Der Einsatz üblicher Freistrahllaser als Laserlichtquelle 1 ist aber auch möglich. Der zeitliche Frequenzverlauf der von der Laserlichtquelle 1 emittierten Lichtimpulse wird mittels eines Prismenkompressors 2 gezielt vorgegeben. Bei dem dargestellten Ausführungsbeispiel wird zu diesem Zweck die Prismenanordnung von den Lichtimpulsen zweifach durchlaufen. Durch den Doppelpfeil ist angedeutet, dass eines der Prismen des Kompressors verstellbar ist, um dadurch gemäß der Erfindung die erzeugten Lichtimpulse abstimmen zu können. Dem Prismenkompressor 2 ist eine nichtlineare dispersionsverschobene und polarisationserhaltende optische Faser 3 nachgeschaltet, in welche das Licht mittels einer Linse 4 eingekoppelt wird. Die in die Faser 3 eingekoppelten Lichtimpulse haben eine Wellenlänge, die der Nulldispersions-Wellenlänge der optischen Faser 3 im Wesentlichen entspricht. Aufgrund in der Faser 3

auftretender nichtlinearer solitonischer Effekte wird das optische Spektrum der Lichtimpulse stark modifiziert. Die aus der optischen Faser 3 austretenden Lichtimpulse, die mittels einer weiteren Linse 5 ausgekoppelt werden, haben ein optisches Spektrum, das empfindlich von dem mittels des Kompressors 2 vorgegebenen "chirp" abhängt. Durch Verstellung des entsprechenden Prismas in dem Kompressor 2 können die aus der Faser 3 austretenden Lichtimpulse im Wellenlängenbereich zwischen $1,1\ \mu\text{m}$ und $2,0\ \mu\text{m}$ verstellt werden. Wie oben beschrieben, weist das optische Spektrum der Lichtimpulse am Ausgang der Faser 3 zwei separate Komponenten auf, die gegenüber der Wellenlänge des eingekoppelten Lichtimpulses zum langwelligen bzw. kurzwelligen Spektralbereich hin verschoben sind. Eine verstellbare spektrale Trennung der beiden Komponenten von mehr als 100 THz ist mit dem dargestellten Aufbau realisierbar. Auch wenn gemäß der Erfindung eine kurze nichtlineare optische Faser 3, die eine Länge von $\leq 10\ \text{cm}$ haben kann, ausreichend ist, kommt es zu einem dispersiven Auseinanderlaufen der Lichtimpulse innerhalb der Faser 3. Dies kann durch einen zusätzlichen Prismenkompressor 6 kompensiert werden. Bei der Verwendung von SF10-Glasprismen wurden mit dem in der Zeichnung dargestellten Aufbau abstimmbare Lichtimpulse mit einer Impulsdauer von ≤ 25 Femtosekunden realisiert. Zur Charakterisierung der Lichtimpulse ist ein FROG-Aufbau oder ein Spektrometer 7 vorgesehen.

Es ist darauf hinzuweisen, dass gemäß der Erfindung zur gezielten Einstellung des "chirps" der in die Faser 3 eingekoppelten Lichtimpulse statt des Prismenkompressors 2 auch andere dispersive optische Komponenten eingesetzt werden können, wie beispielsweise Gitterkompressoren, so genannte "gechirpte" Spiegel, Faser-Bragg-Gitter, zusätzliche dispersive optische Wegstrecken usw.

- Ansprüche -

Patentansprüche

- 5 1. Vorrichtung zur Erzeugung abstimmbarer Lichtimpulse, mit einer nichtlinearen optischen Faser (3), mittels welcher das optische Spektrum von Femtosekunden-Lichtimpulsen unter Ausnutzung solitonischer Effekte modifizierbar ist, g e k e n n z e i c h n e t d u r c h einen der nichtlinearen optischen Faser (3) vorgeschalteten optischen Kompressor (2).
- 10 2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die in die nichtlineare optische Faser (3) eingekoppelten Lichtimpulse eine Impulsenergie von wenigstens einem Nanojoule haben.
- 15 3. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der optische Kompressor (2) verstellbar ausgebildet ist, derart, dass der zeitliche Frequenzverlauf der in die nichtlineare optische Faser (3) eingekoppelten Lichtimpulse veränderbar ist.
4. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die nichtlineare optische Faser (3) polarisationserhaltend und/oder dispersionsverschoben ist.
- 20 5. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die nichtlineare optische Faser (3) einen Kerndurchmesser von weniger als fünf Mikrometern hat.

6. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die nichtlineare optische Faser (3) als mikrostrukturierte photonische Faser ausgebildet ist.

5 7. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Länge der nichtlinearen optischen Faser (3) weniger als einen Meter beträgt.

8. Vorrichtung nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch einen zusätzlichen optischen Kompressor (2), der der nichtlinearen optischen Faser (3) nachgeschaltet ist.

10 9. Vorrichtung nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch ein optisches Messinstrument (7) zur Charakterisierung der mittels der nichtlinearen optischen Faser (3) modifizierten Lichtimpulse.

- Zusammenfassung -

Zusammenfassung

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Erzeugung abstimmbarer Lichtimpulse, mit einer nichtlinearen optischen Faser (3), mittels welcher das optische Spektrum von Femtosekunden-Lichtimpulsen unter Ausnutzung solitonischer Effekte modifizierbar ist. Zur Bereitstellung einer derartigen Vorrichtung, die es ermöglicht, die Impulsenergie und die Wellenlänge der Lichtimpulse unabhängig von einander zu variieren schlägt die Erfindung vor, dass der nichtlinearen optischen Faser (3) ein optischen Kompressor (2) vorgeschaltet ist.

Figur



